

光造形法の歯科領域への応用に関する研究

学位論文内容の要旨

【目的】

光造形法は工業界で近年になって開発された「ラピッド・プロトタイピング&マニファクチャリング」の一手法であり、デジタルの形状データから直接三次元の立体形状を創成するというまったく新しい成型技術である。

この技術の歯科領域への応用は現在、外科矯正などの手術におけるシミュレーション用の骨格モデル作製などで行われており、今後も様々な分野で応用されるものと予想されるが、その場合に問題となるのはその寸法精度であり、特に補綴領域への応用を考えると、高い寸法精度は必要不可欠であると考えられる。

本研究の目的は、光造形法のモデル作製過程における寸法精度の点から検討を行い、要素技術として光造形法の、特に補綴領域を想定した歯科領域への応用の可能性を示すこと、および実際の三次元形状データの取得から光造形装置による立体モデル作製までの一連の手法を確立することである。

【材料と実験方法】

本実験では、光造形装置としてシーメット社製「SOUP400GH」、三次元計測装置としてはニコン社製三次元座標測定機「トライステーション400H」を使用した。

1. 実験1 歯冠を想定した小型モデルについて

光造形法の歯冠補綴物などへの応用を想定し、寸法精度に及ぼす加工条件の影響について検討した。

大白歯の歯冠を想定した一辺10.00mmの立方体を原型とし、レーザのスキャンスピード3条件、積層ピッチ3条件、水平方向のスキャン方式3条件の各条件を組み合わせた計27条件でモデル作製を行い、水平方向の寸法精度について検討した。

さらに最も誤差の小さかったスキャンスピード、スキャン方式の組み合わせの下で、積層ピッチのみを変化させて垂直方向の検討を行った。

2. 実験2 歯列を想定した大型モデルについて

実験1の結果をもとに、歯列模型などへの応用を想定した場合の寸法精度に及ぼす加工条件の影響を検討した。

歯列弓を想定した平面モデルを原型とし、実験1で最も誤差の小さかったスキャンスピード、スキャン方式の組み合わせを採用し、積層ピッチが0.07mm、0.08mm、0.10mmの3条件についてモデル作製を行い、寸法精度の検討を行った。

3. 実験3 全顎歯列モデルの作製

実際の応用を考えた場合、実験1,2のような平面モデルを作製することは殆どなく、自由曲面で構成されたモデルの作製が主になると思われる。そこで本実験では、得られた最適加工条件により全顎歯列模型を作製し、主にその形態再現性の面からその評価を行った。

また、実際の三次元データの取得から光造形法による立体モデル作製(再現)までの一連の手法の確立について検討した。

【結果および考察】

1. 実験 1

いずれの条件でも X 方向に比べ Y 方向の誤差が有意に大きく、これはそれぞれの方向のレーザ走査を制御するガルバノミラーの特性差が考えられ、本装置固有のものと考えられる。

X, Y 両方向において最も誤差が小さかったのは、スキャンスピード: 500mm/s, スキャン方式: Normal スキャン, 積層ピッチ: 0.1mm の場合であり、その際の誤差は X 方向: 31 μ m, Y 方向: 63 μ m であった。

積層ピッチが 0.2mm の設定では、いずれも各積層間が分離しモデル作製は不可能であったが、これは樹脂中でのレーザの減衰率が大きく 0.2mm の深さまで透過しないことが考えられる。

水平方向では、いずれもモデルは設定値よりも大きくなり、スキャンスピードと積層ピッチによる比較からは、レーザ照射が短時間のものほど誤差が小さくなった。一方、垂直方向では積層ピッチの大きさに反比例してモデルは小さくなり、モデル上面の形状は凸面から凹面へと変化した。これは、水平方向では主にレーザの樹脂内部での拡散の影響を受け、垂直方向では重合収縮と表面張力の影響を受けることを示唆しており、この理由として、水平方向ではレーザの照射範囲が局所的であること、さらに樹脂は硬化した瞬間に、その下に存在する既に硬化した樹脂層と接合するため、その重合収縮が規制されてしまうことが考えられる。一方、垂直方向では、硬化した樹脂の下面は同様に下の樹脂層と接合するが、上面は自由液面であり、重合収縮は規制されないと考えられる。

上面形状の変化は、樹脂の表面張力と重合収縮の影響が考えられ、積層ピッチが小さい場合、樹脂の表面張力により液層の中央部が盛り上がるのに対し、大きい場合、液層は適正に平滑化されるものの重合収縮により中央部が陥凹してしまうと考えられる。

2. 実験 2

長径、幅径いずれにおいても積層ピッチが大きいものほどモデルは小さくなり、最も誤差が小さかったのは長径では積層ピッチが 0.1mm の場合で原型に比べて約 555 μ m 拡大し、同じく幅径では 0.08mm の場合で約 191 μ m 拡大した。

これは樹脂の積層方向から考えると、長径方向では樹脂の表面張力と重合収縮の影響、幅径方向ではレーザの樹脂内部での拡散の影響が考えられる。

3. 実験 3

今回使用した光造形装置の形態再現性は非常に優れており、肉眼による観察では小窩裂溝や副隆線部分など咬合面の形態的特徴が忠実に再現された。

これは三次元計測の計測ピッチとモデル作製時の積層ピッチの影響が予想され、今回は三次元計測を 0.2mm ピッチで、モデル作製を 0.08mm 積層で行ったことから、良好な結果が得られたものと考えられる。つまり、細密な形状データを取得し、その計測ピッチ以下の積層ピッチでモデル作製を行った場合には、光造形法は十分な形態再現性を持つということが言える。

表面性状については光造形法は積層加工法であるという性格上、積層ピッチの大小による影響を受けることは避けられないが、日常臨床で行っている歯冠補綴物などの場合も、100 μ m 程度の最終調整は術者が行っていることを考えると、特に実用上問題となるような表面性状ではないものと考えられる。

【結論】

光造形法の歯科領域への応用に関して、補綴領域を想定した基礎的実験、および実際の歯列模型の作製を行い、主に精度の点から実用化の可能性について検討を行った結果、以下の結論を得た。

1. 歯冠補綴物などへの応用を想定した場合の、本装置に限った最適加工条件を求めることができ、その際の誤差は水平方向で約 30~60 μ m, 垂直方向で約 90 μ m であった。これは十分実用可能な値であると考えられた。

2. 同様に歯列模型などへの応用を想定した場合の最適加工条件を求めることができ、その際の誤差は幅径で約 $190\mu\text{m}$ 、長径で約 $660\mu\text{m}$ であった。これは、現状の歯列模型と比較して劣るものと考えられた。しかし、今後、基礎データを蓄積し、最適オフセット量を設定することにより改善できるものと考えられる。

3. 歯列模型の三次元計測データをもとに、実物大の歯列模型を作製することができ、その形態再現性はきわめて良好であり、表面性状も実用上特に問題とはならないものと考えられた。

4. 形態情報のデジタル化、パーソナルコンピュータによる三次元データ処理、光造形装置による立体モデル化という一連の手法を確立することができ、歯科領域における今後の新しい立体モデル活用の方向を示し得た。

5. 本研究の結果から光造形法を歯科領域へ応用できる可能性が示唆された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 内 山 洋 一
副 査 教 授 谷 宏
副 査 教 授 亘 理 文 夫

学 位 論 文 題 名

光造形法の歯科領域への応用に関する研究

本研究の目的は、光造形法の、特に歯科の補綴領域への応用を想定して寸法精度の検討を行うことと、実際の三次元形状データの取得から光造形装置による立体モデル作製までの一連の手法を確立することである。

【材料と実験方法】

本実験では、光造形装置としてシーメット社製「SOUP400GH」、三次元計測装置としてはニコン社製三次元座標測定機「トライステーション400H」を使用した。

実験1 歯冠を想定した小型モデルについて

大白歯の歯冠を想定した一辺10.00mmの立方体を原型とし、レーザのスキャンスピード3条件、積層ピッチ3条件、水平方向のスキャン方式3条件の各条件を組み合わせた計27条件でモデル作製を行い、水平方向の寸法精度について検討した。

さらに最も誤差の小さかったスキャンスピード、スキャン方式の組み合わせの下で、積層ピッチのみを変化させて垂直方向の検討を行った。

実験2 歯列を想定した大型モデルについて

実験1の結果をもとに歯列弓を想定した平面モデルを原型とし、実験1で最も誤差の小さかったスキャンスピード、スキャン方式の組み合わせを採用し、積層ピッチが0.07mm、0.08mm、0.10mmの3条件についてモデル作製を行い、寸法精度の検討を行った。

実験3 全顎歯列モデルの作製

実験1,2で、得られた最適加工条件により全顎歯列モデルを作製し、主にその形態再現性の面からその評価を行った。

また、実際の三次元データの取得から光造形法による立体モデル作製（再現）までの一連の手法の確立について検討した。

【結果および考察】

実験1では、いずれの条件でもX方向に比べY方向の誤差が有意に大きく、X、Y両方向において最も誤差が小さかったのは、スキャンスピード：500mm/s、スキャン方式：Normalスキャン、積層ピッチ：0.10mmの場合であり、その際の誤差はX方向：31 μ m、Y方向：63 μ mであった。

積層ピッチが0.20mmの設定では、いずれも各積層間が分離し、モデル作製は不可能であった。

水平方向では、いずれもモデルは設定値よりも大きくなり、スキャンスピードと積層ピッチによる比較からは、レーザー照射が短時間のものほど誤差が小さくなった。一方、垂直方向では積層ピッチの大きさに反比例してモデルは小さくなり、モデル上面の形状は凸面から凹面へと変化した。これは、水平方向では主にレーザーの樹脂内部での拡散の影響を受け、垂直方向では重合収縮と表面張力の影響を受けることを示唆している。

実験2では、長径、幅径いずれにおいても積層ピッチが大きいものほどモデルは小さくなり、最も誤差が小さかったのは長径では積層ピッチが0.10mmの場合で原型に比べて約555 μ m拡大し、同じく幅径では0.08mmの場合で約191 μ m拡大した。

これは樹脂の積層方向から考えると、長径方向では樹脂の表面張力と重合収縮の影響、幅径方向ではレーザーの樹脂内部での拡散の影響が考えられる。

実験3では、今回使用した光造形装置の形態再現性は非常に優れており、肉眼による観察では小窩裂溝や副隆線部分など咬合面の形態的特徴が忠実に再現された。

以上の結果から次の結論を得ている。

1. 歯冠補綴物などへの応用を想定した場合の、本装置に限っての最適加工条件の誤差は水平方向で約30~60 μ m、垂直方向で約90 μ mで、十分実用可能な値であると考えられた。

2. 同様に歯列模型などへの応用を想定した場合の最適加工条件の誤差は幅径で約190 μ m、長径で約660 μ mで、現状の歯列模型と比較して劣るものと考えられた。しかし、今後、基礎データを蓄積し、最適オフセット量を設定することにより改善できるものと考えられる。

3. 歯列模型の三次元計測データをもとに、実物大の歯列模型を作製することができ、その形態再現性はきわめて良好であり、表面性状も実用上特に問題とはならないものと考えられた。

4. 形態情報のデジタル化、パーソナルコンピュータによる三次元データ処理、光造形装置による立体モデル化という一連の手法を確立することができ、歯科領域における今後の新しい立体モデル活用の方向を示し得た。

5. 本研究の結果から光造形法を歯科領域へ応用できる可能性が示唆された。

このような研究について主査および副査が一堂に会し、口頭により試問と審査を行った。光造形装置の原理などを含め、種々質問を試みたがいずれも適切にして十分な解答が得られた。本研究で光造形法の歯科領域への応用の道を開いたことは高く評価され、博士（歯学）の学位を授与するに値すると審査員一同が認めた。